

40 ans de géodésie à l'IGN¹

2^e partie : géodésie physique

■ Françoise DUQUENNE - Alain COULOMB - Michel KASSER - Martial JEANNOT - François L'ÉCU

Cet article fait suite à celui publié dans le numéro XYZ 161 et comme pour le précédent le lecteur qui voudra en savoir plus pourra consulter l'abondante bibliographie, en particulier les articles XYZ qui sont téléchargeables sur le site web aftopo.org.

La géodésie physique est le domaine de la géodésie qui étudie tout ce qui est associé au champ de pesanteur. L'implication de l'IGN dans ce domaine est essentiellement liée à la détermination des altitudes. En effet, l'altitude est une coordonnée particulière, dont la définition précise dépend du champ de pesanteur. Pour vulgariser cette notion, on peut dire que c'est approximativement la hauteur au-dessus du niveau de la mer et que, pour un lac idéalement homogène et au repos, l'altitude de sa surface en serait constante (équipotentielle du champ de pesanteur). Il est de la responsabilité de l'IGN de définir au niveau national le système de référence verticale et de mettre en place les infrastructures permettant aux utilisateurs d'y accéder. Pendant ces quarante ans, en continuité avec les travaux du NGF (Nivellement Général de la France) commencés au XIX^e siècle, l'objectif de l'IGN a été de densifier et de maintenir un réseau de repères de nivellement de densité homogène sur tout le territoire, du 1^{er} au 4^e ordre. L'arrivée du GPS a été l'occasion de faire évoluer les techniques d'observation, les politiques de maintenance du réseau et les modes d'accès à la référence verticale nationale.

La convention suivante est utilisée dans cet article : millimétrique signifie compris entre 1 et 5 millimètres, centimétrique entre 1 et 5 centimètres, métrique entre 1 et 5 mètres et décamétrique entre 1 et 5 décamètres.

Évolutions du réseau de nivellement métropolitain

■ Le contexte

Constatant, lors des travaux de nivellement de densification des problèmes de précision du NGF/Lallemand, un taux de disparition des repères de l'ordre de 25 %, la direction de l'IGN décide de ré-observer le 1^{er} ordre. Les observations des 13 700 km de lignes de nivellement de 1^{er} ordre sont exécutées en nivellement géométrique (Figure 1) entre 1962 et 1969, auxquelles sont ajoutées des observations gravimétriques de densité suffisante pour garantir une précision de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre. Les niveaux utilisés sont les plus précis d'alors (WILD et IGN) (Figure 3) et l'erreur probable kilométrique estimée à 1,3 mm. La fermeture du polygone extérieur de la France entière est 8 mm (Figure 4).

Les calculs se font en cotes géopotentielles, un mode de calcul différent de celui des altitudes orthométriques utilisées pour le NGF/Lallemand jusque-là, puis sont transformées en altitudes normales. Pour la France continentale, l'origine des altitudes reste la même que celle du NGF/Lallemand, c'est-à-

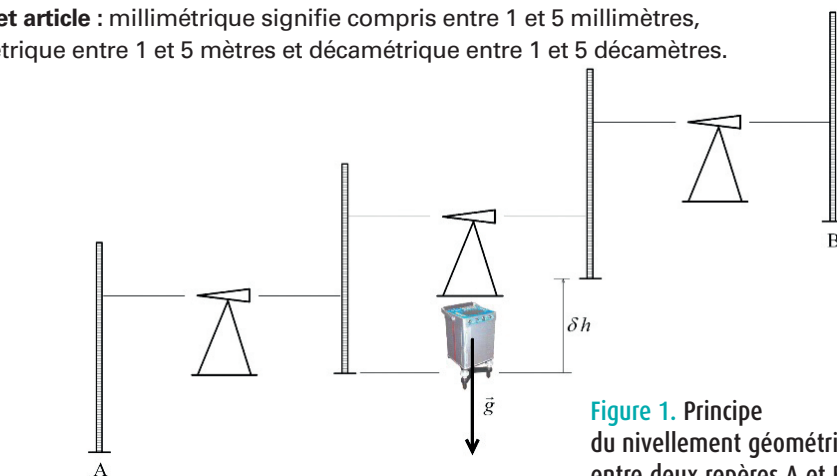


Figure 1. Principe du nivellement géométrique entre deux repères A et B



Figure 2. Repère de nivellement sur mur (IGN)

dire le niveau moyen de la mer issu des observations au marégraphe de Marseille de 1885 à 1897. Pour la Corse, la référence verticale NGF/IGN78 est établie à partir d'un marégraphe situé à Ajaccio.

Le changement, souvent appelé passage "des altitudes orthométriques

Figure 3. Niveaux Wild et IGN



(1) IGN : l'Institut géographique national rebaptisé en 2012 Institut national de l'information géographique et forestière

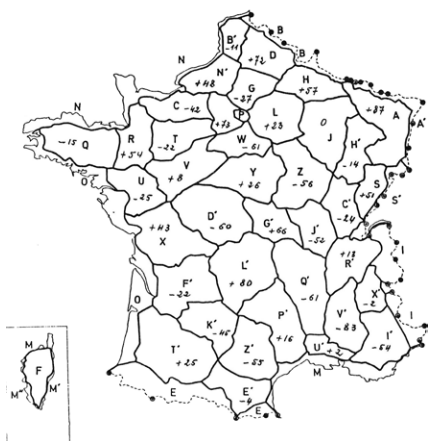


Figure 4. 1^{er} ordre IGN69 : Fermeture des polygones en mm - Levallois (1988)

Lallemand aux altitudes normales IGN69", dont les corrections croissent du sud au nord pour atteindre 60 cm du fait principalement de l'amélioration des observations avec l'ajout de la gravimétrie, du mode de calcul et de façon moindre du changement du type d'altitude normale (Figure 5), a été mal vécu par les utilisateurs car elles dépassaient très largement les incertitudes courantes des mesures de nivellement. Pas mal de confusions regrettables entre la référence ancienne et la nouvelle en ont résulté, compliquant la vie de nombreux professionnels, et il fallut plusieurs décennies pour qu'il soit effectif dans presque tous les domaines d'activités.

Les lignes de 1^{er} ordre de nivellement sont rattachées à 8 marégraphes, des jonctions sont faites avec les nivellements des pays limitrophes et elles

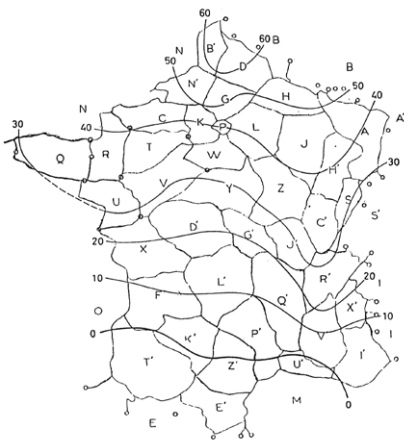


Figure 5. Iso-lignes de discordance entre NGF IGN69 et NGF Lallemand en cm (Levallois (1988))

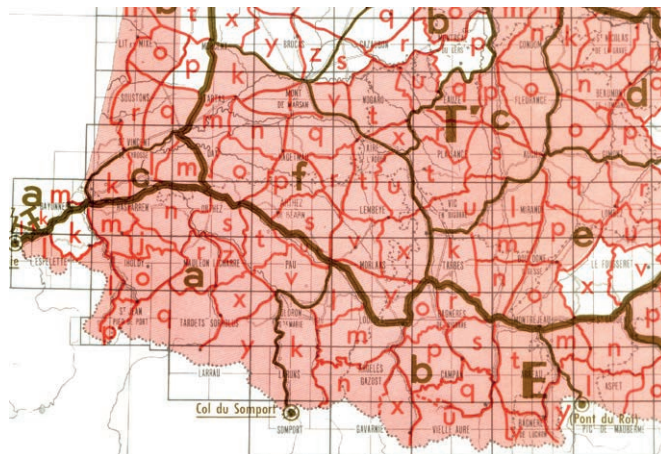


Figure 6. Exemple de polygones et mailles de nivellement (IGN69) montrant les ordres successifs

sont intégrées au réseau européen unifié de nivellement (REUN) devenu ensuite EULN (European Unified Leveling Network).

À la suite de cette rénovation du 1^{er} ordre, sont opérées des campagnes de réfection du 2^e et du 3^e ordre, et une densification de 4^e ordre au rythme annuel de 3 % du territoire. Au total, on compte 256 000 km de lignes et 350 000 repères de nivellement.

■ **Les années 80 : automatisation, motorisation, informatisation**

L'emploi des niveaux automatiques, c'est-à-dire munis d'un compensateur pour maintenir la visée optique horizontale, se généralise avec le Zeiss léna Ni 002 (Figure 7) pour le nivellement motorisé et les niveaux Wild NA2 (Figure 11) et Zeiss Ni2 pour les autres nivellements. L'opérateur assure une horizontalité approchée et le compensateur complète le réglage, ce qui entraîne un gain de temps.

S'inspirant de l'exemple suédois, le nivellement motorisé est développé au sein de l'IGN dès 1979. Une équipe se compose de deux véhicules porte-mire munis de dispositifs pour la verticalisation de la mire et un véhicule pour le niveau et l'opérateur, dont la plateforme arrière est trouée pour permettre la descente du trépied du niveau sur le sol. Ce nivellement géométrique motorisé (NIGEMO) est mis en production dès 1980.

Outre une bien meilleure précision (effets de la réfraction très limités, matériel plus lourd et stable, niveau Ni 002 extrêmement précis), la rapidité de progression de l'équipe est bien plus

élevée, ainsi que sa sécurité, et au final le coût d'exécution diminue de 30 % environ.

Dès 1983, la traverse Dunkerque-Marseille est ré-observée en NIGEMO, ce qui confirme le systématisme nord-sud du NGF mais montre aussi un systématisme probable de l'IGN69 de 25 cm.

Le nivellement géométrique est une technique à la fois simple et précise, mais qui devient moins efficace en zone montagneuse car les pentes et les virages des routes obligent à réduire les portées.

La technique trigonométrique utilisée en géodésie et qui a prouvé son extrême précision sur courtes distances en métrologie pour déterminer les altitudes des points est alors envisagée pour le



Figure 7. Équipement NIGEMO et niveau automatique Zeiss léna Ni 002

nivellement de précision. Il s'agit de faire des visées zénithales réciproques et simultanées et mesures de distances. Celles-ci sont plus courtes qu'en géodésie (quelques centaines de mètres). Le nivellement trigonométrique motorisé (NITRIMO), initialement appelé nivellement de précision motorisé (NIPREMO), est composé de deux véhicules identiques au véhicule "niveau" du NIGEMO, sur lesquels les opérateurs en contact radio se visent simultanément. Initié en 1982 [Kasser M. (1982)] avec des Kern DKM2A et DM 502, il tire pleinement parti de l'arrivée des premières stations totales de très haute précision (Kern E2), et trouve son plein emploi dans les zones de montagne, où il permet une diminution supplémentaire de coûts de l'ordre de 25 %. Un de ses points intéressants est la capacité d'ajuster la précision aux besoins du chantier, en autorisant une distance plus ou moins longue entre les stations. Avec une distance maximale de 300 mètres, on atteint une erreur probable kilométrique de 1.3 mm, typique d'un premier ordre. Avec 600 m, le coût est nettement réduit, et l'erreur probable kilométrique atteint 4 mm [Kasser M.(83), Kasser M.(84), Kasser M.(85)]



Figure 8. NITRIMO : équipement véhicules et théodolite Kern DKM2A

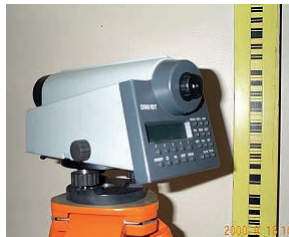


Figure 9. Niveau zeiss DIN10

Figure 10. Niveau Trimble DiNi



Cette technique est mise en production, principalement sur le 4^e ordre, en 1986. Cette année-là 850 kilomètres sont nivelés et 1 312 repères de nivellement observés, la longueur moyenne de visée est de 280 mètres, la vitesse moyenne de progression de 2,5 km/heure et l'erreur probable kilométrique est inférieure à 4 mm.

Dès 1993, les niveaux numériques apparaissent. Les mesures se font automatiquement par lecture d'une mire code-barres (Figure 9 et Figure 10) et le niveau est muni d'un processeur pour calculer dénivelée et distance.

Cette décennie voit aussi apparaître les micro-ordinateurs en particulier de terrain, et le carnet d'observation papier est remplacé par une saisie informatique. Les premiers essais sont menés en 1979 avec un appareil développé sur mesure, le SOSI SP2K (2K veut dire 2K de RAM... [Kasser M. (1980)]. Rapidement le premier ordinateur portable EPSON HX-20 est ensuite choisi, dès 1980. Ses caractéristiques (voir encadré page suivante) feraient sourire les jeunes générations, mais ce premier portable était vraiment robuste et a permis à l'IGN la numérisation et le contrôle automatisé sur le terrain des observations ainsi que la saisie du descriptif du repère de nivellement



Figure 11. Niveau Wild NA2 et saisie sur Epson HX-20

indispensable pour que l'utilisateur le retrouve sur le terrain. Il a été employé pendant près d'une décennie...

Un autre aspect de l'évolution informatique concerne la gestion des données avec l'arrivée des bases de données. La base de données géodésique (BDG) [Duquenne F. (1991a)] fait partie des premières de l'IGN, et le domaine nivellement est le premier traité. La saisie des 350 000 fiches de nivellement commence en 1985, une unité de 20 personnes se consacre dès lors à la saisie sur micro-ordinateurs à double disquette (2 x 512 Ko).

Les systèmes de gestion de bases de données (SGBD) commencent à poindre, et très vite le développement en DBASE III d'un petit logiciel de consultation des fiches signalétiques des repères de nivellement est mis à disposition du comptoir de la diffusion géodésique sur micro-ordinateur avec support disquettes et possibilité d'impression remplaçant avantageusement le système de microfiches. C'est sous le SGBD Oracle qu'est ensuite implémentée la base de données géodésique sur un serveur général, et les fiches de nivellement deviennent consultables partout à l'intérieur de l'IGN.

Pour la diffusion extérieure, il faut attendre 1991 et la diffusion des repères

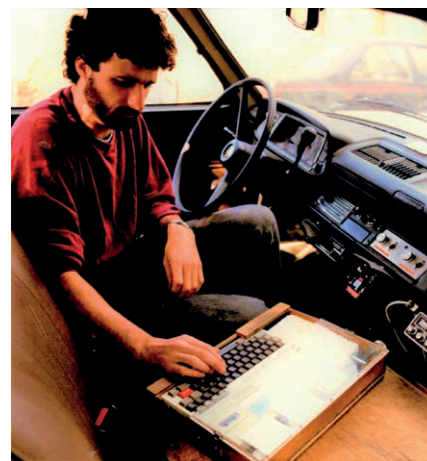


Figure 12. Secrétariat NIGEMO



Figure 13. Ordinateur portable EPSON HX-20

Caractéristiques de l'ordinateur portable EPSON HX-20

- taille A4, poids 1,7 kg
- écran cristaux liquides : 4 lignes de 20 caractères
- imprimante matricielle de 24 caractères de large
- mémoires : ROM de 32 K + RAM de 32K
- enregistrement données et logiciel sur micro-cassette magnétique

réseaux de nivellement dès 2000 [Kasser M.(2000)]. Elle sera achevée en 2006, et met en évidence que 13 % des repères sont détruits, et 8 % sont non retrouvés. Pour compléter le descriptif, une photo numérique du repère est prise sur le terrain et la localisation en coordonnées améliorée par des mesures avec des récepteurs GPS de navigation, passant d'une précision décimétrique à métrique, et publiées en Lambert-93. Elle permet de mettre à jour la base de données, et de ne pas fournir aux utilisateurs des fiches de repères qui n'existent plus sur le terrain, évitant ainsi des pertes de temps. Par ailleurs, par extraction de la BDG et introduction dans un SIG (Système d'information géographique), elle permettra de faire des sorties cartographiques des repères en bon état et ainsi, zone par zone, d'identifier les triplets (Figure 14) avec des spécifications précises [Kasser M., Bonnetain P. (2003)].

Il s'avère que dans certains endroits la couverture en triplets n'est pas suffisante et donc, conjointement à la visite, de nouveaux triplets sont créés avec une méthode d'observation innovante combinant nivellement de précision et GPS, appelée Nivellement assisté par GPS (NIVAG). Les détails sont donnés dans [Coulomb A. (2009b)] et [Duquenne F., Coulomb A. et L'Écu F. (2015)].

Les opérations de NIVAG durent de 2001 à 2008, période au cours de laquelle 4 000 nouveaux triplets sont créés. La

de nivellement de 8 départements de Rhône-Alpes [Duquenne F. (1991b)]. Cette diffusion utilise le Minitel car Internet à ce moment-là n'est pas encore utilisé de façon courante et on n'y fait que des transferts de fichiers ; le Web ne sera lancé qu'en 1990 aux USA et utilisé en France que quelques années plus tard.

Les critères de recherche sont simples (matricule du repère, commune, département, zone donnée en coordonnées Lambert) mais les utilisateurs sont vite acquis à ce nouveau type de diffusion qui, quoique payante, leur évite de se déplacer au bureau de la diffusion géodésique à Saint-Mandé. Étendue à la France entière, cette diffusion sera opérationnelle jusqu'en 2000 et sera remplacée par une diffusion gratuite sur Internet à partir de 2002 [Kasser M. (2003)].

■ Mise en place d'une politique d'entretien du réseau : "les triplets"

Les opérations de réfection du réseau sur le terrain (NIGEMO, NITRIMO) confirment le fort taux de destruction des repères de nivellement et un groupe de travail du CNIG est formé pour décider de la politique à venir. Le NGF a-t-il encore une utilité justifiant une dépense de l'État, doit-on privilégier la réfection des 1^{er}, 2^e, 3^e ordres ou bien densifier le 4^e ordre ? Une enquête utilisateur est lancée en 1995.

Suite aux résultats de l'enquête qui met en évidence qu'un accès précis aux altitudes est impérativement nécessaire sur tout le territoire, mais essentiellement là où il y a des installations humaines, une politique totalement nouvelle de maintenance du réseau NGF est décidée : au lieu d'essayer d'entretenir les

260 000 km de lignes de nivellement, seuls des triplets (au moins 3 repères proches) seront entretenus, répartis sur tout le territoire de telle sorte que toute habitation soit au maximum à 5 km d'un triplet et permette à tout utilisateur de se rattacher avec une précision millimétrique par nivellement de précision, et centimétrique par GPS en utilisant la grille de conversion RAF98 (voir plus loin). Au sein d'un triplet, les dénivelées sont de précision submillimétrique, ce qui permet de tester facilement la stabilité de chaque RN, même si l'un d'eux est détruit. Cela revient à ne plus entretenir que les 11 % les plus utiles des repères du réseau. L'économie qui en résulte est considérable, on estime alors que le coût d'entretien du NGF est divisé par un facteur 25 !

Pour commencer à mettre en place cette nouvelle politique d'entretien du réseau, une visite systématique des repères est entreprise par le département des

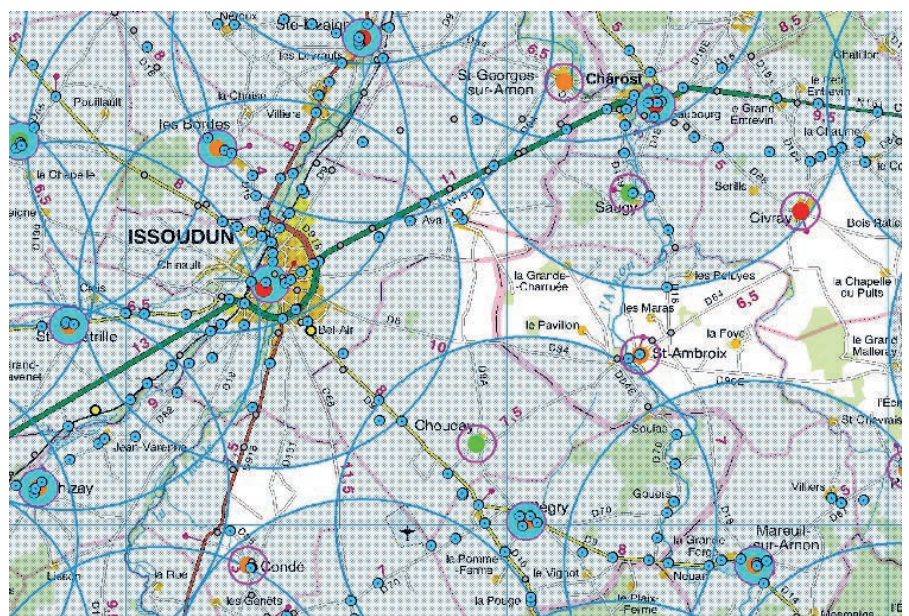


Figure 14. Identification de triplets sous SIG [Coulomb A. (2009b)]



Figure 15. Observations NIVAG
France entière est couverte par environ 13 000 triplets.

Les opérations de NIVAG couvrent des objectifs différents :

- mise en place des triplets et préparation de la phase d'entretien subséquente (ERNIT, voir ci-après),
- grâce à la longue durée (plus de 48 h) des observations GPS menées sur le pivot temporaire établi dans chaque feuille au 1/50 000 près d'une borne RBF, et rattaché au NGF, amélioration importante de la qualité des mesures d'écart ellipsoïde / quasi-geoïde sur près d'un millier de points, ce qui permettra ensuite l'amélioration de la grille de conversion altimétrique (voir RAF09),
- et de manière accessoire, amélioration de la précision planimétrique du RBF, qui est à chaque fois rattaché avec soin au pivot temporaire.

L'hybridation des techniques d'observations de nivellement et de GPS a une conséquence sur les métiers de terrain ; les opérateurs qui auparavant étaient spécialisés soit nivellement, soit géodésie, deviennent pluridisciplinaires ajoutant même la gravimétrie à leurs compétences. Les départements des réseaux de géodésie et réseaux de nivellement sont fusionnés en 2005 en un département des réseaux de référence matérialisés, constituant ainsi une unité terrain d'une vingtaine de personnes qui sera également fortement sollicitée pour des travaux facturés à l'étranger.

La base de données géodésique est modernisée à partir de 2005 et la migration est réalisée sous le SGBD PostgreSQL. La diffusion des fiches de nivellement se fait sur Internet (geodesie.ign.fr) et bénéficie du développement du Géoportail IGN. Des statistiques de consultation du site web permettent d'appréhender le taux d'utilisation du réseau de nivellement

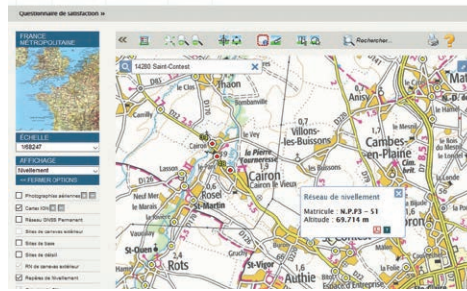


Figure 16. Serveur de fiches de nivellement
(<https://geodesie.ign.fr/fiches/>)



Figure 17.
Fiche de nivellement (IGN)



Figure 18. ERNIT, observation au niveau Trimble DINI (ph IGN)

qui reste à environ 20 000 fiches par mois malgré le développement des GNSS.

Il reste à contrôler la stabilité par nivellement de précision des repères formant les triplets identifiés par la visite avant la phase NIVAG. C'est l'objet de la campagne ERNIT (Entretien du réseau de nivellement par les triplets), démarrée en 2008 et qui devrait se terminer en 2020. Au final, environ 13 000 triplets sont réobservés et l'ancienneté d'observation moyenne passe de 25 à 6 ans (Figure 19).

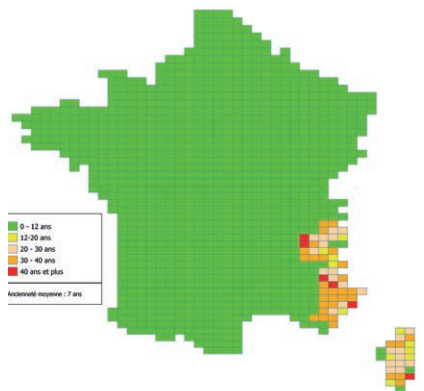


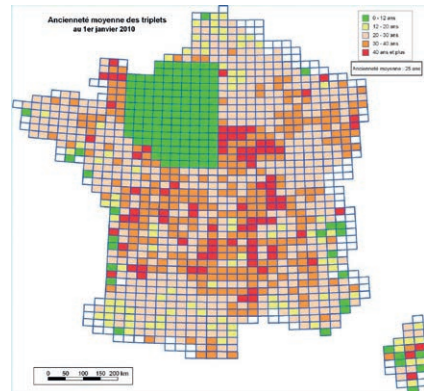
Figure 19. Evolution de l'ancienneté moyenne des triplets du 01/01/2010 au 01/01/2020 (SGM/IGN)

Par ailleurs, des observations GNSS utilisant le RGP (Réseau GNSS permanent) devenu très dense permettent d'attribuer à chaque triplet une hauteur ellipsoïdale précise et dans la réalisation 2009 du RGF93 ce qui :

- fournit un jeu très dense de 13 000 points GPS-nivelés sur la France entière pour la grille de conversion RAF,
- permet d'utiliser les GNSS pour mesurer et tenir compte des déformations du réseau dans les zones instables (activités minières, battements de nappes phréatiques, activité tectonique, etc.).

Un quasi-geoïde de précision, lien indispensable entre la géodésie physique et la géodésie spatiale

Comme vu dans la première partie "géodésie spatiale" dans la revue XYZ n° 161, à partir de 1993 le GPS prend de plus en plus d'importance et les observations permettant de créer le nouveau système géodésique commencent. Si ce nouvel outil n'est pas encore très précis pour la détermination des



► hauteurs, la perspective est très prometteuse. Mais la hauteur purement géométrique au-dessus d'un ellipsoïde n'est pas pertinente à elle seule, seules les altitudes par rapport au géoïde permettent de maîtriser l'écoulement gravitaire des eaux, usage principal des réseaux de nivellement dont les applications sont multiples dans le génie civil, ou la prévention d'inondations. Il faut donc disposer d'un outil permettant de convertir les hauteurs-ellipsoïde en altitudes-géoïde.

Dès le début de la géodésie spatiale, le géoïde gravimétrique calculé dans les années 70 [Levallois J.J. (1988)] s'avère insuffisamment précis et le Lareg (Laboratoire de recherche en géodésie de l'IGN) conjointement avec l'ESGT (École supérieure des géomètres et topographes) entreprend donc à nouveau des études de détermination de modèle de géoïde, en fait plus exactement de quasi-géoïde, c'est-à-dire la hauteur de la surface origine des altitudes normales par rapport à l'ellipsoïde dans le nouveau système géodésique RGF93 [Duquenne H. (1998), Levallois J.J. (1999), Duquenne H. (1998)].

Le calcul du quasi-géoïde utilise environ 400 000 points de gravimétrie de surface disponibles au BGI (Bureau gravimétrique international) et de sources diverses (principalement du BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) et de l'IGN, mais aussi d'universités), des modèles numériques de terrain de l'IGN et des pays voisins et le logiciel Danois Gravsoft. La récupération des données et les calculs, faits sur micro-ordinateur Pentium, dura deux ans et la première version, baptisée QGF96 sort en 1996.

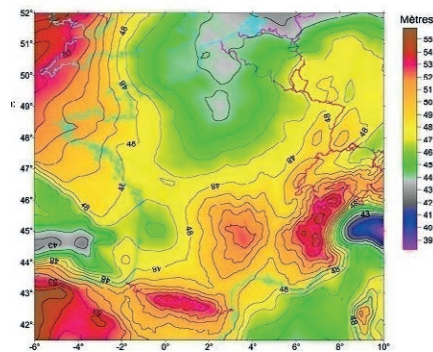


Figure 20. Quasi-géoïde QGF98 (Duquenne H. (1998))

Les points du RBF (Réseau de base français) sont pendant ce temps rattachés au réseau de nivellement, et comparés à QGF96. Des écarts assez importants demandent des contrôles, reprises ou éliminations de données. Une deuxième version sort en 1998 (QGF98) (Figure 20), présentée au 2^e Symposium sur le géoïde en Europe à Budapest [Duquenne H. (1998a)].

La grille RAF98 (Référence altimétrique française) [Duquenne H. (1998b)], qui permet de convertir une hauteur GPS en altitude est calculée par adaptation de QGF98 aux points GPS du RBF nivelés. Cette grille est validée officiellement par la commission "positionnement statique et dynamique" du Conseil national de l'information géographique (CNIG). Sa précision évaluée sur les jeux de points GPS-Nivelés de provenance diverses (EDF, SNCF, Villes, etc.) est estimée à 3 cm sur 90 % du territoire, les zones montagneuses étant moins précises.

Le quasi-géoïde QGF98 a des problèmes de précision, en particulier dans le sud de la France, et ne permet pas de fournir une grille suffisamment précise sur la Corse. Le problème vient de la gravimétrie marine en Méditerranée.

Une collaboration entre l'IGN, l'INSU (Institut national des sciences de l'univers), l'ESGT, KMS (Danemark), l'université de Bergen (Norvège) offre

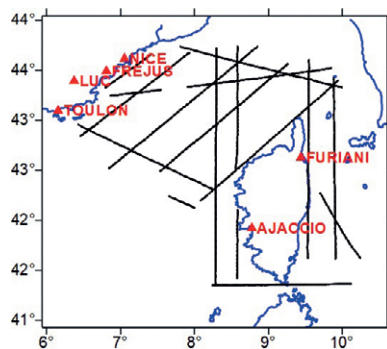


Figure 21. Levé gravimétrique aéroporté

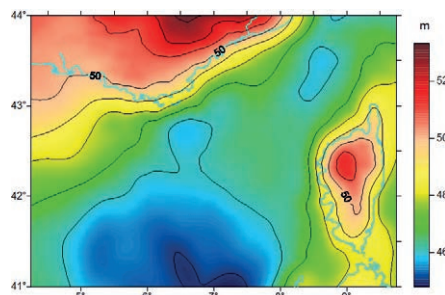


Figure 22. Quasi-géoïde QGC02

l'opportunité de faire un levé gravimétrique aérien entre la Corse et le continent (Figure 21) et le calcul du quasi-géoïde QGC02 (Figure 22) [Duquenne H., Olesen A., Forsberg R., Gidskehaug A. (2004)]. La grille de conversion RAC09 est ensuite déduite de QGC02 et de 60 points GPS nivelés issus du NIVAG en Corse [Duquenne F. (2010)].

Sur la France continentale, une nouvelle grille RAF09 est calculée en 2010 à partir du quasi-géoïde QGF98, en tenant compte de la nouvelle réalisation du RGF93 [Harmel A. (2010)] qui fait bouger les hauteurs GPS jusqu'à 10 centimètres, et utilise environ 1 000 points GPS-nivelés déterminés pendant le NIVAG.

Un nouveau quasi-géoïde (QGF16) est calculé en 2016. Il intègre les nouvelles données gravimétriques (RBF, levés gravimétriques aéroportés sur la Méditerranée, levés en bateau (SHOM), un MNT IGN plus précis, un nouveau modèle de champ global).

Au fur et à mesure de l'avancement des observations ERNIT, des grilles sont calculées (RAF2016, RAF18) et la dernière version devrait paraître en 2020. La précision de RAF2018 est 1 cm à 1 sigma.

Sur la Corse la nouvelle grille sera calculée après la campagne ERNIT 2020. À condition d'utiliser la méthode GNSS adéquate, ces nouvelles grilles permettent de déterminer une altitude au niveau du centimètre sans être obligé de se rattacher au réseau de nivellement.

À nouveau la question d'entretenir un réseau de nivellement se pose et une nouvelle enquête utilisateur est lancée par le CNIG. Cet entretien est nécessaire pour les zones instables, celles qui sont déjà connues, et l'interférométrie radar systématique sur le territoire pourrait aussi permettre d'identifier des zones instables non répertoriées. On peut remarquer ici que le quasi-géoïde et donc la grille seront quasiment insensibles à ces mouvements, car il faudrait des déplacements verticaux de la surface topographique de plusieurs mètres pour qu'ils varient d'un centimètre. Donc une variation de hauteur sur un RN est identique à une variation d'altitude. Des mesures GNSS calculées avec le RGP permettront de déterminer

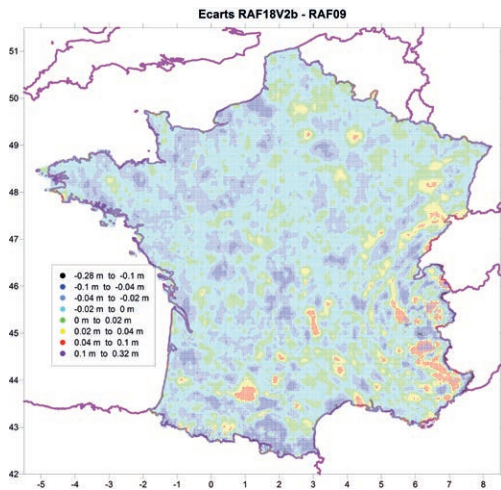


Figure 23. Écarts entre RAF09 et RAF2018

les déplacements d'un triplet, tandis que le nivellement de précision en vérifiera la stabilité interne.

Gravimétrie

L'IGN qui n'avait quasiment plus fait d'observations gravimétriques depuis les mesures sur les 1^{er} et 2^e ordres IGN reprend cette activité indispensable pour la détermination de géoïde précis. La gravimétrie utilisée pour le calcul de QGF98 avait montré des problèmes de référencement aussi bien géographique que gravimétrique. Pour améliorer le quasi-géoïde, il était nécessaire de pouvoir recalibrer cette gravimétrie.

Un groupe de travail "réseaux gravimétriques et géoïde de référence" est créé au sein du CNIG en 2000 et un sous-groupe "gravimétrie" réunissant la communauté de producteurs et utilisateurs de gravimétrie de surface BRGM, EOST (École et observatoire de Strasbourg), IPG (Institut de physique du globe), BGI (Bureau gravimétrique international), SHOM (Service hydrographique et océanographique de la marine), IRD (Institut de la recherche pour le développement), IGN. Il conclut dans son rapport à la nécessité de moderniser le réseau gravimétrique sur la France, dans une référence gravimétrique mondiale : "La réalisation d'un tel réseau est rendue possible par les progrès de la métrologie gravimétrique absolue et relative. Ce réseau devra avoir pour référence un réseau fondamental constitué de mesures absolues régulièrement réitérées, et comporter des réseaux de premier et deuxième ordres établis à partir du réseau fondamental par liaisons relatives. Ces

réseaux devront être en colocalisation avec des réseaux géodésiques."

L'IGN entreprend donc dès l'année 2000 le réseau de 1^{er} ordre. Les observations sont faites sur le réseau de base français (RBF), complétant ainsi les coordonnées tridimensionnelles RGF93, l'altitude précise IGN69 par des valeurs d'intensité de la pesanteur au sol. Le RBF devient alors un réseau géodésique combiné. La matérialisation de ce réseau qui a fait l'objet d'un entretien continu en fait un bon support pour les observations de gravimétrie tout en évitant de reconstruire.

Les observations commencent en 2000 avec des gravimètres relatifs Scintrex CG5 (Figure 24) prêtés par l'IPGP (l'Institut de physique du globe de Paris) qui forme aussi le personnel de terrain de l'IGN. En 2004 l'IPGP, l'IRD et l'IGN achètent en commun un gravimètre absolu transportable A10 (Figure 25) et les observations de gravité absolue sur le RBF débutent en 2005. La mission d'observations 2011 en Corse achève la couverture gravimétrique en France métropolitaine.



Figure 24. Mesure avec le gravimètre relatif CG5 sur le RBF du marégraphe de Marseille [Gattacceca (2011)]



Figure 25. Mesure avec le gravimètre absolu A10 sur un RBF

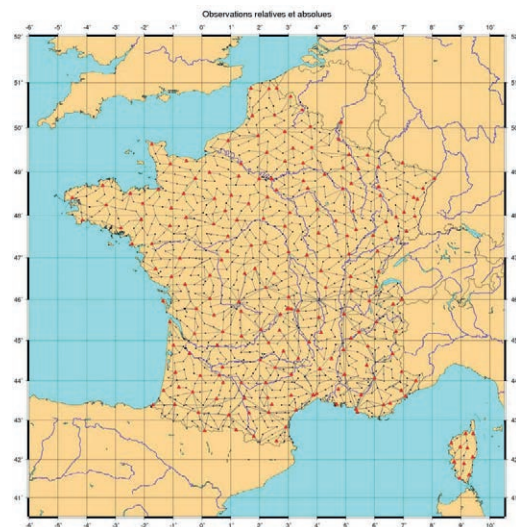


Figure 26. Observations gravimétriques sur le RBF [Gattacceca T. (2011)]

La carte (Figure 26) montre la répartition des mesures absolues (triangles rouges). La compensation générale du réseau donne une estimation de la précision à 20 μgal qui respecte les spécifications du rapport CNIG (entre 10 et 30 μgal). Les valeurs de g sont publiées sur les fiches signalétiques du RBF et donc facilement accessibles. Elles ont été aussi fournies à la base de données mondiale du BGI.

Un article du décret 2011-1371 du 27 octobre 2011 attribue à l'IGN la responsabilité de la gestion et de l'entretien d'une référence gravimétrique nationale.

Un nivellement de référence (NIREF), contribution au réseau de nivellement Européen

La comparaison de QGF98 avec les points RBF GPS-nivelés, permet de confirmer la pente nord-sud du NGF-IGN69. Afin de compléter et d'améliorer les résultats issus de la traverse Marseille-Dunkerque de 1983, les spécifications d'un nivellement scientifique de référence (NIREF) sont élaborées [Duquenne H. (1996)] dans le but d'étudier les déformations de l'IGN69 et offrir une nouvelle contribution au réseau de nivellement européen (REUN - UELN). En 2000 débutent les observations NIREF, le SGN consacrant environ 16 % du temps terrain à cette activité, il faudra plus de vingt ans pour en venir à bout. Le réseau est composé de longues traverses nord-sud et est-ouest qui relie des marégraphes, ainsi les



Figure 27. Itinéraires NIREF (IGN)

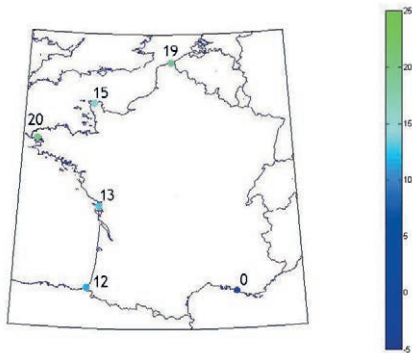


Figure 28. Différences de niveau moyen de la mer aux marégraphes NIREF [Leclercq J., Coulomb A. (2017)]



réseaux de nivellement de pays limitrophes. Les observations se font en NIGEMO avec les niveaux Zeiss Iéna Ni 002 et Trimble DiNi. La précision estimée est $0,8 \text{ mm/km}^{1/2}$.

Seules les traverses à l'extrême est comportent des mesures de gravimétrie, car elles traversent des zones montagneuses. Pour les autres, la gravimétrie est issue de la grille gravimétrique générée pour le calcul du quasi-géoïde. Les calculs au fur et à mesure confirment la pente nord-sud de l'IGN69 et aucune pente est-ouest.

La traverse Marseille-Dunkerque est

ré-observée entre 2012 et 2016 et présente une différence de 8 cm par rapport à celle de 1983, valeur qui rentre dans la barre d'erreur, et finalement une compensation de NIREF avec les deux traverses donne un systématisme de l'IGN69 de 20 cm [Leclercq J., Coulomb A. (2017)].

NIREF permet aussi d'avoir une meilleure connaissance du décalage entre les niveaux moyens des mers aux marégraphes NIREF et confirme que la Méditerranée est plus basse d'environ 20 cm par rapport à la Mer du Nord (Figure 28).

Les données des traverses NIREF ont été fournies au fur et à mesure à la commission EUREF pour être intégrées au réseau de nivellement européen EULN (European Unified Levelling Network) et participer ainsi à la réalisation du système de référence EVRS (European Vertical Reference) [Duquenne F., Coulomb A. et L'Écu F. (2015)].

Dans le calcul de la nouvelle réalisation EVRF2019, les traverses NIREF ont une précision estimée à $1,39 \text{ mm/km}$ alors que le 1^{er} ordre IGN69 est estimé à $3,08 \text{ mm/km}$. Les écarts entre la nouvelle réalisation et la précédente (EVRF2007) montrent la prise en compte du systématisme de l'IGN69 dans l'EVRF2019 (Figure 30). La conséquence est une amélioration de la conversion des altitudes entre les références française et européenne, sous forme d'une grille de conversion. Une compensation des observations du 1^{er} ordre s'appuyant sur le NIREF est en cours afin d'affiner cette grille.

Dans la réalisation EVRF2019, la Grande-Bretagne est enfin raccordée

précisément. En effet c'est par du nivellement dans le tunnel sous la Manche, juste avant sa mise en fonction que ce rattachement de la Grande-Bretagne a été assuré. L'IGN a fait un cheminement de nivellement géométrique et l'Ordonnance Survey un nivellement trigonométrique. Ces deux cheminements ont donné des dénivelées qui différaient de 4 cm. Après de longues discussions techniques, ne sachant pas qui avait raison et dans l'impossibilité de refaire ces mesures à cause de l'activité ferroviaire, un accord est passé en 2007, lors du symposium EUREF à Londres pour adopter la moyenne des deux dénivelées.

La directive européenne Inspire impose l'utilisation de la référence EVRF pour les altitudes. La France, comme les autres pays Européens, se donne les moyens de convertir les altitudes dans le cadre des échanges européens.

L'utilisation de EVRF en France implique une correction d'amplitude moyenne de 50 cm variable sur tout le territoire, due à la correction du systématisme IGN69, mais aussi du fait que les origines des deux systèmes, ne sont pas les mêmes. Le niveau moyen de la Méditerranée à Marseille et celui de la Mer du Nord ne sont pas sur la même équipotentielle de pesanteur (Figure 28) ; d'autre part ces niveaux moyens varient dans le temps (Figure 31), en plus de manière un peu différente, et les dates de référence choisies ne sont pas les mêmes.

Il n'est pas décidé de changer le système vertical français, mais dans le cadre d'études réclamant une altitude scientifique de haute précision sur une grande distance, les altitudes EVRF seront indispensables.

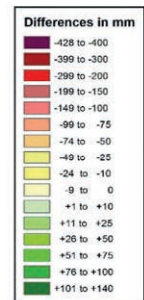
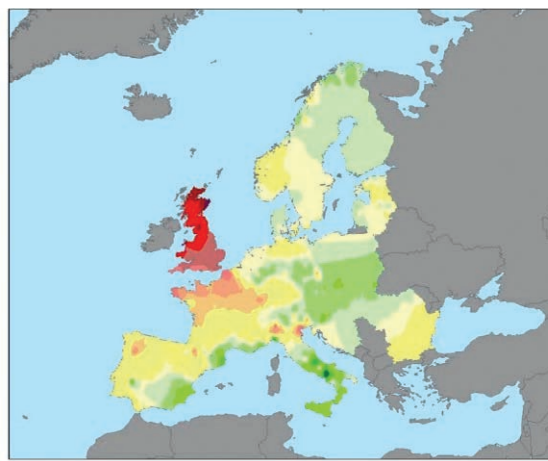
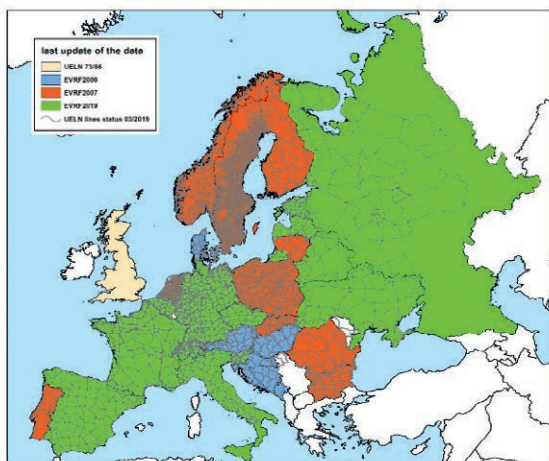


Figure 29. Le réseau européen : EULN [Sacher M., Leibsch (2019)] - Figure 30. Différences entre EVRF2007 et EVRF2019 [Sacher M., Leibsch (2019)]



La réalisation d'un système de référence verticale internationale (IVRS) à l'échelle mondiale met du temps à aboutir et même si l'EVRS en sera probablement une composante, l'origine ne sera pas définie de la même façon. L'important pour l'IGN actuellement est de participer aux travaux européens et mondiaux. Il est prévu en particulier, de mesurer des différences de potentiel de pesanteur avec des horloges atomiques entre les nœuds du NIREF spécialement entre les marégraphes.

Grâce à la grande précision de la grille de conversion entre l'IGN69 et le RGF93, toutes les conversions entre les différentes réalisations de référence terrestre (TRF) et les différentes réalisations de référence verticale (VRS), qu'elles soient européennes ou mondiales, seront faciles à réaliser précisément.

Le marégraphe de Marseille

Le marégraphe de Marseille est le seul marégraphe français sous la responsabilité de l'IGN, du fait de son importance pour la référence verticale nationale. En 2002, le marégraphe est classé monument historique. Une très importante rénovation des bâtiments a lieu en 2006-2007. Les diagrammes fournis par le marégraphe mécanique sont numérisés au début des années 2000. Le marégraphe de Marseille est équipé d'une station GPS permanente en 1998. En même temps, en collaboration avec le SHOM, le marégraphe mécanique est doublé par un premier marégraphe numérique à ondes acoustiques. Cet appareil est remplacé en 2009 par un autre marégraphe numérique fonctionnant grâce à des ondes radar.

L'intérêt actuel du marégraphe de Marseille, intégré à plusieurs program-

mes nationaux et internationaux de surveillance du niveau des mers, est très lié au suivi de l'un des effets des changements climatiques, la hausse globale de ce niveau. La longueur de sa série d'observations (135 ans presque sans interruption), permet d'établir une tendance à long terme très fiable. Depuis 1885, le niveau moyen de la Méditerranée s'est élevé d'un peu plus de 16 cm à Marseille. [Coulomb A. (2009a)] [Coulomb A. (2014)]

Les références verticales en outre-mer

Pendant la période récente les réseaux de nivellement outre-mer ont aussi été entretenus, densifiés et améliorés, profitant des méthodes développées pour la France métropolitaine, mais aussi tenant compte de leurs spécificités.

Missions	Nivellement	Gravimétrie
Guyanne	2002-2003-2005-2006	2015
Mayotte	2006	2016
Île de la Réunion	2007	2016
Guadeloupe	2009	2013
Martinique	2009	2014
Saint-Pierre-et-Miquelon	2018	2018

Tableau. Missions d'observations outre-mer (IGN).

Des grilles de conversions hauteurs altitudes sont calculées, certaines après un calcul de quasi-géoïde, d'autres par adaptation géométrique de points GNSS-nivelés.

Le quasi-géoïde de l'île de la Réunion (QGR06) est calculé en 2006 et la grille RAR07 adaptée sur 60 points GPS nivelés. La grille sur Mayotte est calculée uniquement avec des points GPS-nivelés.

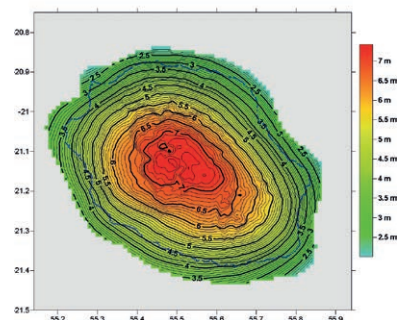


Figure 32. Île de la Réunion : grille RAR07

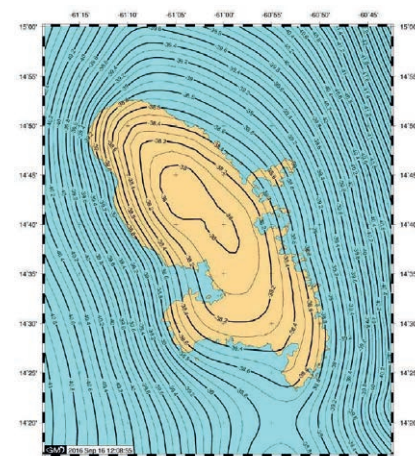


Figure 33. Mayotte : grille GGM04 (geodesie.ign.fr)

Conclusion

Les travaux de réalisation d'un système de référence verticale national ont toujours été longs et minutieux. Durant ce demi-siècle, l'IGN a su en améliorer la précision, l'accès aux utilisateurs, la politique d'entretien, tout en augmentant sa productivité en exploitant au mieux les innovations techniques. Ce travail a été fait dans un cadre à la fois national (CNIG) et européen (EUREF).

Cette activité régalienne développée au niveau national, garantissant un même accès sur tout le territoire, lui a permis d'avancer plus vite dans la modernisation que d'autres pays fédéraux qui ont dû unifier des réseaux développés régionalement.

Avec ses travaux en géodésie spatiale et géodésie physique, la France fait partie des pays les mieux équipés et nous remarquerons ici que les États-Unis, après avoir entrepris depuis 10 ans des campagnes denses de mesures gravimétriques aéroportées, des calculs de géoïde à haute défini-

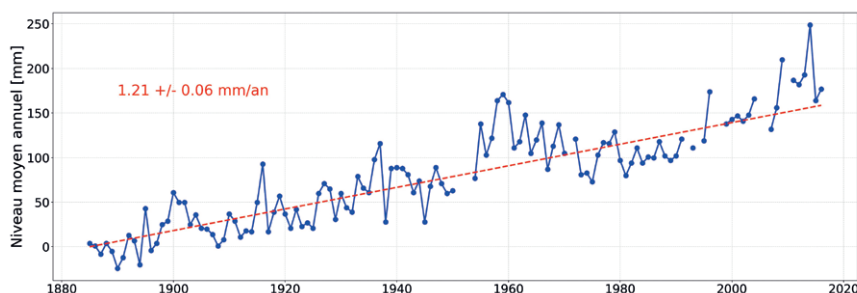


Figure 31. Élévation du niveau de la mer à Marseille depuis 1885





tion, prévoient pour 2022 la réalisation d'une nouvelle référence verticale. Les réalisations IGN ont bénéficié au secteur privé, dans le contexte du développement des réseaux GNSS temps réel, offrant ainsi à leurs clients la possibilité de se positionner et de déterminer très facilement une altitude dans les références nationales avec une précision centimétrique. ●

Contacts

Françoise DUQUENNE, ex-chef du service de géodésie et nivellement de l'IGN, fh.duquenne@wanadoo.fr

Alain COULOMB, chef du département des réseaux matérialisés (SGM/IGN), alain.coulomb@ign.fr

Michel KASSER, ex-chef du service de géodésie et nivellement de l'IGN, michel.kasser@gmail.com

Martial JEANNOT, ex-chef du département des réseaux de nivellement (SGNM/IGN), marcha.jeannot@wanadoo.fr

Références

CNIG (2000) rapport technique du sous-groupe "gravimétrie" juin 2000

Coulomb A. (2009a) *Le marégraphe de Marseille : patrimoine et modernité* XYZ n° 118 pp 17-24

Coulomb A. (2009b) *Entretien du réseau de nivellement par les triplets* - XYZ n° 119 pp. 39-42, 2^e trimestre 2009

Coulomb A. (2014) *Le marégraphe de Marseille - 130 ans d'observation du niveau de la mer* - presses des ponts/AFT 2014

Coulomb A. (2017) *L'IGN fabricant de Yaourt : Actipom* - XYZ n° 152 pp. 37-38 3^e trimestre 2017

Bonnetain P. (1987) *Instruction à l'usage des techniciens du département de nivellement IT/G n° 100*, IGN/SNM/ département de nivellement

Duquenne F. (1991a) *La base de données géodésique* XYZ n° 47 pp. 18-21 avril 1991

Duquenne F. (1991b) *"L'IGN met son nivellement sur Minitel : une opération pilote de l'IGN"* XYZ n° 47 pp. 30-31 avril 1991

Duquenne F., Coulomb A. et L'Ecu F. (2015) *La démarche française de modernisation de la référence Verticale* XYZ n° 143, 2015 2^e trimestre pp. 21-28

Duquenne F., L'Ecu F. et Gazaux J. (2017) *Géοide : mythe ou réalité ?* XYZ n° 150, 1^{er} trimestre 2017, pp. 41-48

Duquenne F. (2010) *Descriptifs quasi-géοides et grilles de conversion altimétriques sur la France métropolitaine* - IGN/SGN et IGN/LAREG, IT/G n° 351

Duquenne H. (1996) *Projets de spécifications produit du nivellement de référence Français* IGN/SGN

Duquenne H., Kasser M., Harmel A. (1998) *Dossier GPS et nivellement* revue Géοmètre n° 6, juin 1998

Duquenne H. (1998a) *QGF98, a new solution for the quasigeoid in France*. In: Presented at the 2nd Symposium on the geoid in Europe - Budapest, Reports of the Finnish Geodetic Institute (1998)

Duquenne H. (1998b) *Grille de correction pour effectuer du nivellement par GPS* revue Géοmètre n° 6, juin 1998

Duquenne H., Olesen A., Forsberg R., Gidskehaug A. (2004) *Amélioration du champ de pesanteur et du géοide autour de la Corse* XYZ n° 101, 4^e trimestre 2004 pp. 67-74

Duquenne H. (2005) *Recueil d'articles publiés sur le Géοide et le nivellement avec GPS de 1998 à 2004*, IGN/SCN CC/G 630, janvier 2005

Harmel A. (2010) *Rénovation du RGF93* Revue XYZ n° 124, 3^e trimestre 2010 pp. 36-40

Kasser M. (1989) *"Un nivellement de très haute précision : la traverse Marseille Dunkerque 1983"* C.R. Acad.Sci. Paris, t. 309, série II, pp. 695-700, 1989

Kasser M. (1980) *La saisie électronique des données de nivellement de précision sur le terrain*. Actes de la Convention Informatique, 1980, Paris

Kasser M. (1982) *Expérience de nivellement trigonométrique motorisé de précision* Bulletin KERN N° 34, 1982, Aarau (Suisse), pp. 8-10

Kasser M. (1983) *Essais de Nivellement Indirect de Précision Motorisé (NIPREMO)* Bull. Inf. IGN 83/1, pp. 21-25

Kasser M. (1984) *Une méthode d'avenir, le Nivellement Indirect de Précision Motorisé (Nipremo)* Bull. Inf. IGN 84/2, pp. 45-46

Kasser M. (1985) *Recent advances in high precision trigonometric levelling (Nipremo) in I.G.N.* France Proceedings of the third North American Vertical Datum Symposium, Rockville, Maryland, 21-26 avril 1985, pp. 57-64

Kasser M. (2000) *The new French policy for Geodesy and Levelling*, in Proceedings of the

FIG Seminar "The Mediterranean Surveyor in the new millenium", Malta, 18-21 Sept. 2000. 6 pages.

Kasser M. et Bonnetain P. (2003) *Status of the Maintenance of the NGF French National Levelling Network by GPS*. in Proceedings of the FIG Working Week 14-17 April 2003, Marne-La-Vallée. TS 8.1, 8 pages.

Kasser M. (2003) *L'IGN, service public, sait aussi être gratuit*. Géοmètre N° 12. Décembre 2003. p. 30.

Leclerq J., Coulomb A. (2017) *Nivellement de très haute précision* XYZ n° 153, 4^e trimestre 2017, pp. 52-54

Levallois J.J. (1988) *Mesurer la Terre* Presse de l'école nationale des ponts et chaussées/AFT

Levallois J.J. (1999) *géοide et nivellement* XYZ n° 80, 3^e trimestre 1999, pp. 17-29

L'Ecu F. (2017) *Calcul du quasi-géοide QGF16 et de la grille de conversion altimétrique RAF16 : état d'avancement et perspectives* XYZ n° 150, 1^{er} trimestre 2017, pp. 49-51

Sacher M., Leibsich (2019) *EVRF2019 as new realization of EVRS BKG 2019*

ABSTRACT

Physical geodesy is the field of geodesy which studies everything associated with the gravity field. The involvement of IGN in this area is essentially linked to the determination of altitudes. Indeed, altitude is a particular coordinate, the precise definition of which depends on the gravity field. To popularize this notion, we can say that it is approximately the height above sea level and that, for an ideally homogeneous and resting lake, the altitude of its surface would be constant (equipotential of the gravity field). It is the IGN's responsibility to define the vertical reference system at the national level and set up the infrastructures allowing users to access it. During these forty years, in continuity with the work of the NGF (General Leveling of France) started in the XIXth century, the objective of the IGN was to densify and maintain a network of benchmarks of leveling of homogeneous density on all territory, from 1st to 4th order. The arrival of GPS was an opportunity to develop observation techniques, network maintenance policies and modes of access to the national vertical reference.